

18CrNiMo7-6钢渗碳工艺优化

权慧斌

渗碳是为了改善工件的性能，使工件从表面到心部形成一定的碳浓度梯度，满足工件表层高硬度、高耐磨性，心部具有良好的韧性与塑性，即“外硬里韧”的工艺要求。

国电包头公司生产的风力发电增速齿轮箱中的二级传动行星轮，采用材料18CrNiMo7-6是德国DIN标准的优质合金渗碳结构钢，具有良好的力学性能和加工性能。为了进一步优化渗碳淬火工艺，同时使工件的表面得到更佳的碳浓度梯度，进行了以下工艺试验。

1. 试验材料及方法

（1）试验材料　试验材料为18CrNiMo7-6合金渗碳钢，化学成分如表1所示，试验对象为圆棒试样和齿形试样；圆棒试样车床加工为ϕ30mm×50mm，齿形样模数为9，如图1、图2所示。

（2）试验设备　试验设备为爱协林VKES6/4可控气氛箱式多用炉，炉温均匀度为±5℃，碳势均匀性为±0.05%。渗碳介质为甲醇加丙酮，采用氧探头自动控制，可以有效地控制碳势。

（3）试验工艺　所有试样均采用同一种热处理渗碳淬火工艺，不同的是试样的化学成分。进炉前对试样进行打磨，表面粗糙度Ra=1.6μm。每组试样经过两段渗碳（强渗、扩散）→高温回火→淬火→低温回火，渗碳淬火工艺曲线如图3所示，试验工

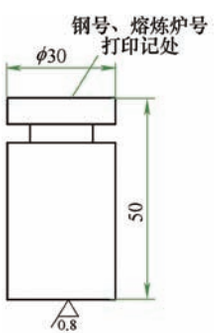


图1　圆棒试样

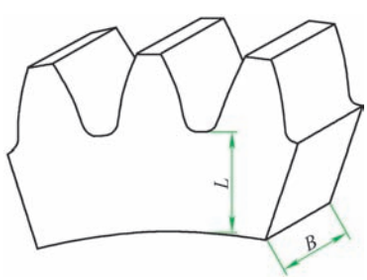


图2　齿形试样

表1　试样化学成分（质量分数）　（%）

试样编号	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni
No1齿形样	0.213	0.278	0.574	1.58	0.300	1.67
No2齿形样	0.197	0.34	0.616	1.71	0.316	1.88
No3齿形样	0.191	0.272	0.602	1.56	0.295	1.61
No1圆棒样	0.192	0.287	0.590	1.54	0.303	1.42
No2圆棒样	0.183	0.335	0.634	1.68	0.300	1.80
No3圆棒样	0.197	0.272	0.609	1.55	0.288	1.61

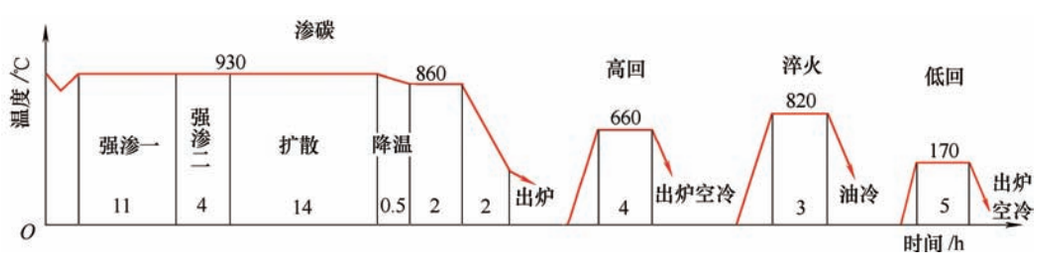


图3　试验钢种的热处理工艺曲线

艺参数见表2。

所有热处理工序结束后，在OLYMPUS GX51高级金相系统显微镜上观察显微组织，在HVS-1000A显微维氏硬度计上测量有效硬化层深度和表面硬度。

2. 试验结果及分析

（1）渗层显微组织及碳化物分析　按照JB/T6141.3—1992《重载齿轮渗碳金相检验》金相显微组织检验，随炉试样渗碳层的金相组织应为细针或隐晶马氏体及少量残留奥氏体，碳化物为均匀分布的细小颗粒碳化物。图4为18CrNiMo7-6合金钢经过此工艺渗碳淬火后的表面组织照片。从照片可以看出，18CrNiMo7-6钢采用此工艺时，所有试样均得到了弥散分布的颗粒碳化物组织，无块状或针状碳化物，碳化物为1级。弥散分布的颗粒碳化物可提高齿轮的疲劳强度和耐磨性，有益于延长渗碳齿轮的使用寿命。

图5为不同试样渗碳淬火后的显微组织，从图中可以看出，试样渗碳淬火后的渗层显微组织主要为细针和隐晶马氏体，有少量的残留奥氏体，含量为5%左右。

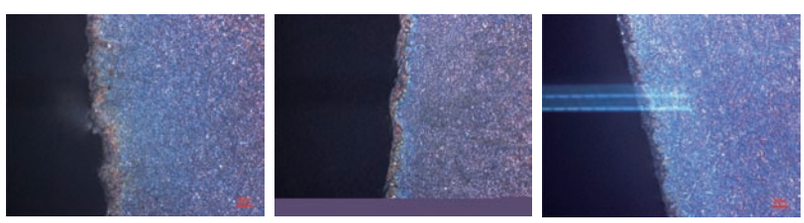
（2）显微硬度分析　根据GB T9450—2005《钢件渗碳淬火硬化层深度的测定和校核》，以表面至550HV距离定义为有效硬化层深。有效硬化层深及硬度分布是渗碳零件的重要指标，试样的硬度分布如图6所示。

从图6a和图6b可以看出，圆棒试样的表面硬度和齿形试样节圆表面硬度都在720HV（61.0HRC）以上，若单边节圆的磨量为0.4mm，磨齿后工件齿面硬度在700～710HV，满足设计要求的齿面硬度60～63HRC。从硬度分布曲线中，可以判定有效硬化层深度即渗层厚度为2.3～2.5mm，所有检测的试样渗层除尖角效应区外，均满足工艺2.2～2.5mm的要求。

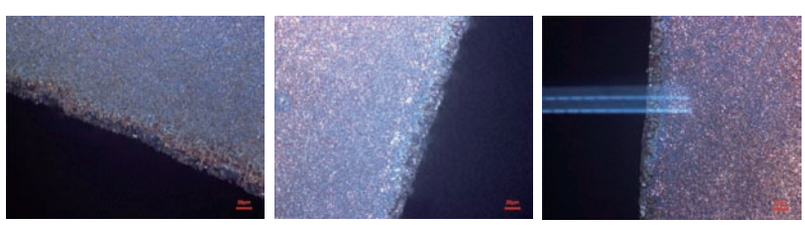
（3）心部组织及心部硬度

表2　试验钢的热处理工艺参数

试样号	齿形样			圆棒样		
	No1	No2	No3	No1	No2	No3
强渗一碳势（%）	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05
强渗二碳势（%）	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
扩散碳势（%）	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80
高温回火	660℃保温4h					
淬火	820℃保温3h					
低温回火	170℃保温5h					

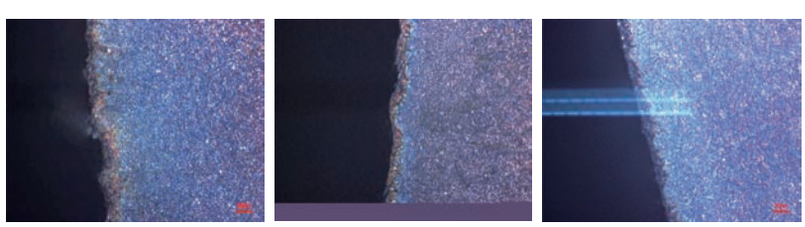


（a）No1圆棒样　（b）No2圆棒样　（c）No3圆棒样

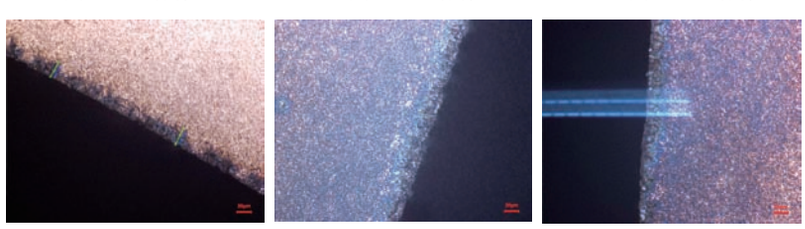


（d）No1齿形样　（e）No2齿形样　（f）No3齿形样

图4　18CrNiMo7-6不同试样的渗碳层碳化物分布



（a）No1圆棒样　（b）No2圆棒样　（c）No3圆棒样



（d）No1齿形样　（e）No2齿形样　（f）No3齿形样

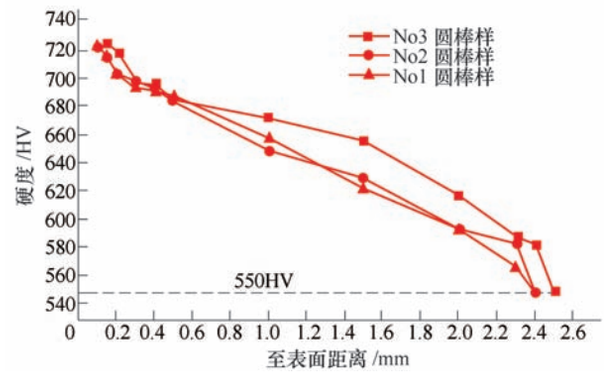
图5　18CrNiMo7-6不同试样的渗碳层显微组织

分析　18CrNiMo7-6试样心部组织及硬度如表3所示。

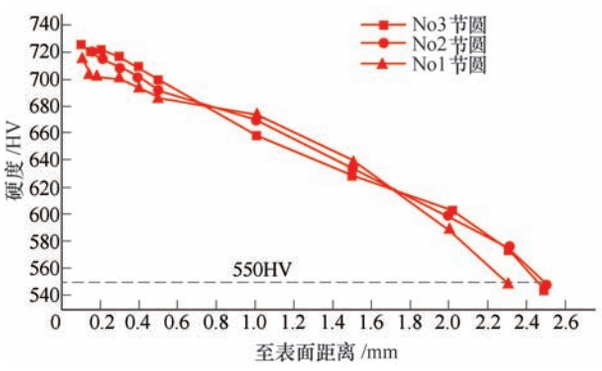
试样于820℃加热淬火后，表层获得细针马氏体或隐晶马氏体以及少量残留奥氏体（见图5），马氏体级别1级，这种组织硬度较高，耐磨性好。心部组织主要为强韧性良好的低碳马氏体（见图7）。马氏体的粗细及均匀度对使用性能影响很大，马氏体越细小，力学性能特别是韧性越好，马氏体越粗大，性能越差。如淬火温度越低，奥氏体化不充分，使表层产生非马氏体组织而心部组织转变不完全，对性能产生不良影响。国电包头公司生产的二级行星轮，工件渗碳淬火后还进行后续的车削或磨削加工。因此，为了兼顾后续的机加工艺，淬火温度易采用820℃，使表面和心部的硬度有最佳的匹配，即既有高的表面硬度又有良好的心部硬度。

（4）内氧化深度及分析　根据GB/T3480.5—2008《直齿轮和斜齿轮承载能力计算第5部分》中的ME级要求，当渗碳层深1.5mm<e≤2.5mm时，内氧化（IGO）＜20μm，2.25mm≤e＜3.0mm时，内氧化（IGO）＜25μm；试样的具体检测结果见表4、图8。

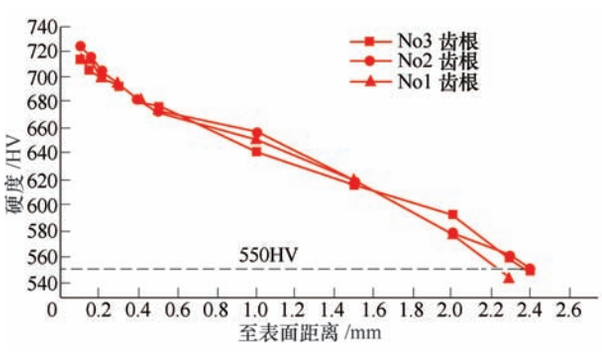
通过以上数据可以看出，试样的有效硬化层深为2.3～2.5mm，内氧化为15～25μm，符合GB/T3480.5—2008《直齿轮和斜齿轮承载能力计算第5部分》中的ME级要求。内氧化未形成网状，只是条状。因此，工艺参数能有效控制内氧化的深度，单从试验对象结果来看均无



(a)



(b)



(c)

图6　试样渗碳层的显微硬度分布

表3　18CrNiMo7-6试样心部组织及硬度

试样号		淬火温度/℃	渗层组织	渗碳层硬度HRC	心部组织	心部硬度HRC
齿形样	No1	820	细针M+少量残留A	60.8	板条状M+少量游离F	47.1；46.8；47.6
	No2	820	细针M+少量残留A	61.2	板条状M	46.2；46.2；46
	No3	820	细针M+少量残留A	61.2	板条状M+少量游离F	43.5；43.6；43.8
圆棒样	No1	820	细针M+少量残留A	61.1	板条状M	45.5；45.6；45.8
	No2	820	细针M+少量残留A	61	板条状M+少量游离F	45.3；45.5；45.7
	No3	820	细针M+少量残留A	61.2	板条状M+少量游离F	45.3；46.6；46.5

内氧化超标现象。

3. 低温回火

淬火后一般在150~200℃进行回火，可获得以马氏体为主的组织。渗碳层在使用状态下应为回火马氏体+均匀分布的颗粒碳化物+少量残留奥氏体，具有高的强度、硬度、耐磨性及一定的韧性。

因为低于200℃回火时，马氏体中过饱和的碳原子以ε碳化物形式析出，极为细小、弥散度度极高，所以硬度并不降低。同时，由于以ε碳化物形式析出，晶格畸变降低，使淬火应力减小。随着回火温度的升高，马氏体进一步分解，硬度随之降低。

因此，渗碳件低温回火以160~180℃为宜，高于200℃表面硬度明显下降。

4. 试验结论

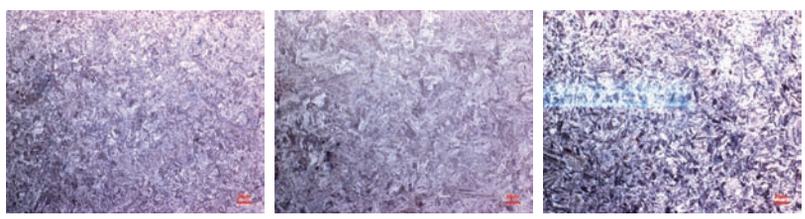
（1）18CrNiMo7-6钢采用强渗碳势1.05%、扩散碳势0.80%，表面可获得弥散分布的颗粒碳化物组织和较高的表面硬度，表面w_C为0.8%左右。

（2）18CrNiMo7-6钢采用此工艺渗碳，圆棒试样和齿形试样有效硬化层达到了2.4mm左右，渗碳层显微硬度曲线分布比较平缓，表面组织为细针或隐晶马氏体，以及少量残留奥氏体组织。

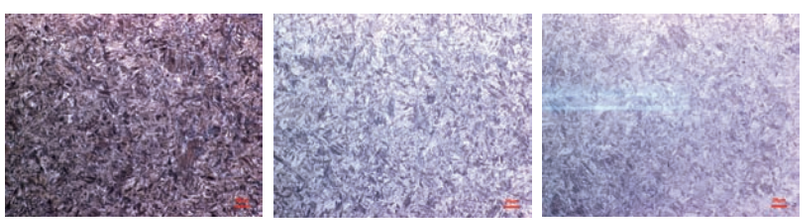
（3）圆棒试样和齿形试样的心部组织均为板条状马氏体，心部硬度44~47HRC，内氧化在25μm以内。

5. 对比结果

为了分析此工艺与原工艺的硬度梯度曲线分布，现将此工艺的圆棒试样、齿形试样与原工艺随炉圆棒样、齿形样的结果进行汇总，结果见表5～表7、图9～图11。



（a）No1圆棒样　（b）No2圆棒样　（c）No3圆棒样

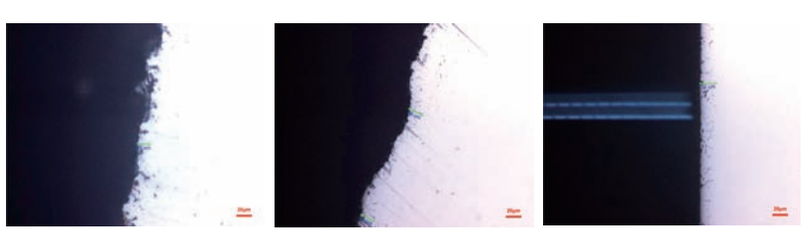


（d）No1齿形样　（e）No2齿形样　（f）No3齿形样

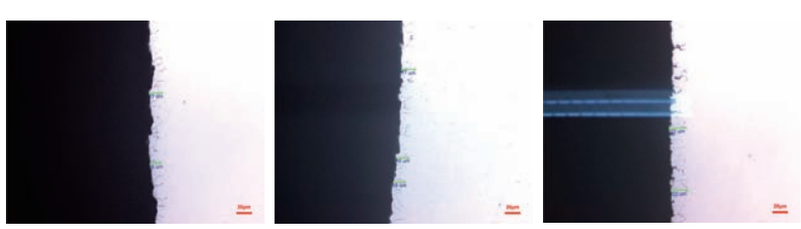
图7　18CrNiMo7-6不同试样心部组织

表4　18CrNiMo7-6试样有效硬化层深及内氧化深度

项目	试样号	渗碳层深/mm	内氧化/μm
齿形样	No1	节圆：2.3；齿根：2.28	节圆：17；齿根：15
	No2	节圆：2.5；齿根：2.43	节圆：17；齿根：18
	No3	节圆：2.45；齿根：2.30	节圆：22；齿根：25
圆棒样	No1	2.4	16
	No2	2.5	19
	No3	2.5	25



（a）No1圆棒样，IGO=16μm（b）No2圆棒样，IGO=19μm（c）No3圆棒样，IGO=25μm



（d）No1齿形样，IGO=15μm（e）No2齿形样，IGO=17μm（f）No3齿形样，IGO=25μm

图8　18CrNiMo7-6不同试样内氧化深度

表5 圆棒样维氏硬度数据对比

至表面距离/mm		0.1	0.15	0.2	0.3	0.4	0.5	1.0	1.5	2.0	2.3	2.5
硬度HV	原工艺	701	703	699	696	691	690	654	612	595	570	550
	现工艺	725.1	716.5	704.1	694.3	691.6	688.8	658.9	622.9	595	568.1	545
	原工艺	695.6	682.1	689.5	687.5	690.1	689.6	660.9	638.4	604.3	560	550
	现工艺	723.1	709.2	704.9	700.3	693.4	684.4	650	630	594.5	584.9	550

表6 节圆维氏硬度数据对比

至表面距离/mm		0.1	0.15	0.2	0.3	0.4	0.5	1.0	1.5	2.0	2.3	2.32
硬度HV	原工艺	706	710	713	700	694	683	646	637	580	557	550
	现工艺	717	704	703	702	695	687	675	641	596	550	—
	原工艺	701.6	711.6	707.1	699.2	691.6	680.8	654.7	637.3	590.5	550	—
	现工艺	726.3	721.3	715.4	710.1	702.6	692.4	671.6	635.9	598.9	576.7	550

表7 齿根维氏硬度数据对比

至表面距离/mm		0.1	0.15	0.2	0.3	0.4	0.5	1.0	1.5	2.0	2.3	2.32
硬度HV	原工艺	694	691	687	698	681	673	630	610	556	550	—
	现工艺	714	715	700	695	683	674	652	620	575	550	—
	原工艺	702.4	715.3	701.8	686.2	672.5	659.8	634.1	606.1	550	—	—
	现工艺	724.6	716.9	706.2	698	685.8	674.5	658.7	620.2	580	562.4	550

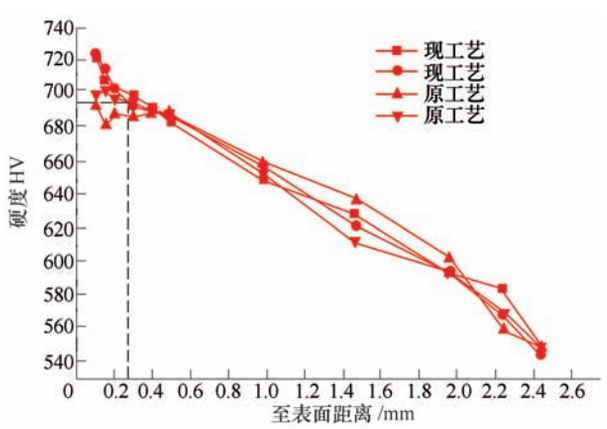


图9 圆棒样硬度分布曲线

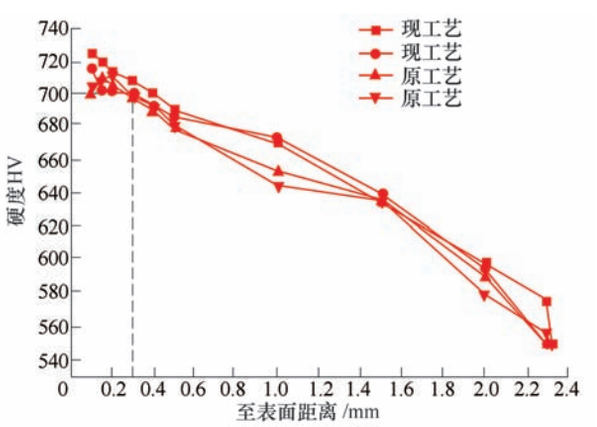


图10 节圆硬度分布曲线

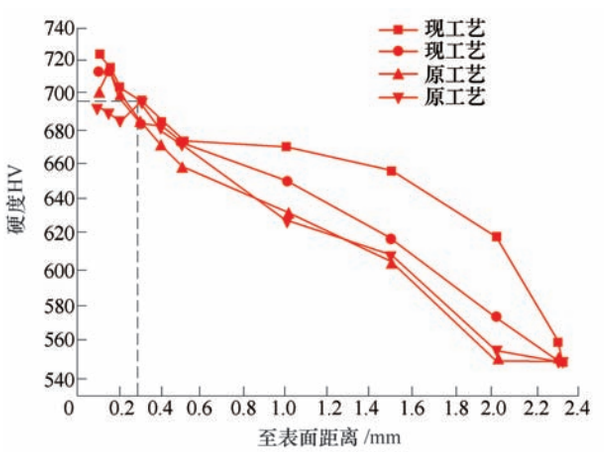


图11 齿根硬度分布曲线

作者简介：权慧斌，国电联合动力技术（包头）有限公司工艺室。

MW 20170228